

Aus der Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und  
Kieferkrankheiten der Universität Marburg  
Geschäftsf. Direktor: Prof. Dr. Dr. H.-J. Hering

---

ÜBER DIE PRÜFUNG DER KURZZEITFESTIGKEIT  
EINES DENTALKUNSTSTOFFES NACH  
UNTERSCHIEDLICHEN VORBELASTUNGEN,  
UNTERSUCHT AM PALADON 65

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des Doktorgrades der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Humanmedizin  
der Philipps-Universität Marburg  
vorgelegt von

WOLFGANG KÜMPEL

aus Marburg/L.

Marburg 1977

---

Druck: Görich & Weiershäuser, Marburg



Aus der Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und  
Kieferkrankheiten der Universität Marburg  
Geschäftsf. Direktor: Prof. Dr. Dr. H. -J. Hering

ÜBER DIE PRÜFUNG DER KURZZEITFESTIGKEIT  
EINES DENTALKUNSTSTOFFES NACH  
UNTERSCHIEDLICHEN VORBELASTUNGEN,  
UNTERSUCHT AM PALADON 65

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des Doktorgrades der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Humanmedizin  
der Philipps-Universität Marburg  
vorgelegt von

WOLFGANG KÜMPEL

aus Marburg/L.

Marburg 1977

---

Druck: Görich & Weiershäuser, Marburg



Angenommen vom Fachbereich Humanmedizin der  
Philipps-Universität Marburg am 11.3.1977

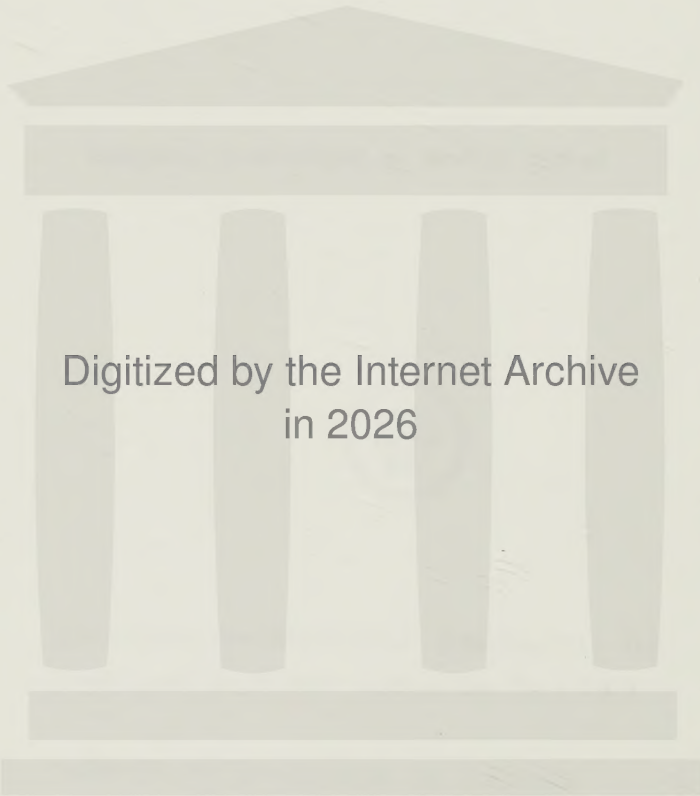
Gedruckt mit Genehmigung der Fakultät

Dekan: Prof.Dr.F.Neurath

Referent: Prof. Dr. G. Janke

Correferent: Prof.Dr.H.Bernhardt

Meinen Eltern in Dankbarkeit gewidmet



Digitized by the Internet Archive  
in 2026

# INHALTSVERZEICHNIS

## A. EINLEITUNG

## B. HAUPTTEIL

### I. Werkstoffkundliche Untersuchungen an Kunststoffen

#### a) Biegeversuche

#### b) Zugversuche

##### 1. Spannungs-Dehnungs-Kurve

##### 2. Zeitstandsfestigkeitslinie

#### c) Die Festigkeit des Kunststoffes und der Bruch

### II. Eigene Versuche

#### a) Die Prüfkörper und ihre Herstellung

##### 1. Anteigen des Kunststoffes

##### 2. Polymerisation

##### 3. Ausarbeitung

#### b) Die Vorbelastung der Prüfkörper

#### c) Die Zugfestigkeitsprüfung

##### 1. Die Prüfmaschine

##### 2. Die Ermittlung der Zuggeschwindigkeit

#### d) Ergebnisse der Versuche

#### e) Diskussion der Versuchsergebnisse

C. ZUSAMMENFASSUNG

D. LITERATURVERZEICHNIS

E. ANHANG

(Graphische Darstellungen und Tabellen)

## A. EINLEITUNG

Wenn dem prothetisch arbeitenden Zahnarzt heute für seine Arbeiten, sei es totaler Ersatz oder Kunststoffverblendungen an Brücken und Kronen, von Jahr zu Jahr immer bessere und leichter zu verarbeitende Kunststoffe zur Verfügung stehen, so ist dies nicht zuletzt das Verdienst der werkstoffkundlichen Untersuchungen.

An einen modernen dentalen Kunststoff werden eine ganze Reihe hoher Anforderungen gestellt, um ein qualitativ hochwertiges Endprodukt zu erhalten. Ein Teil dieser Eigenschaften wird vom Material selbst bestimmt, ein anderer sehr großer Teil kann durch Verarbeitungsmethoden positiv und negativ verändert werden.

Eigenschaften wie: Mundbeständigkeit, Geschmacksneutralität, einfache und rationelle Herstellung, sowie gute Reparaturfähigkeit bestimmt der Kunststoff selbst.  
(HAEFLI, MATTHES)

Aber schon geringfügige Veränderungen der Herstellungsverfahren können günstige Eigenschaften wie: Spannungsfreiheit, Elastizität, Dichte und nicht zuletzt die Festigkeit verschlechtern und ungünstige, wie z.B. Porosität, bewirken.

Diese Eigenschaften werden durch Art und Homogenität des Molekulargefüges bestimmt. Eine Reihe anderer Faktoren

wie: Anmischart, Polymerisationsart, Preßdruck, Einfluß des Wassers auf die Polymerisation, Abkühlungsart, Art der Ausarbeitung, mit einem Wort physikalische Faktoren ändern das Molekulargefüge des Kunststoffes und damit seine Eigenschaften.

Um auf das Anwendungsgebiet unseres Kunststoffes, den Zahnersatz, zurückzukommen, ist die Festigkeit eine der wichtigsten und meistuntersuchtesten Eigenschaften. Die Festigkeit des Prothesenkautschuks, den der Kunststoff ablöste, konnte von den Methacrylaten nicht erreicht werden. Mit den verschiedenartigsten Mitteln wurde versucht die Festigkeit zu erhöhen. So wurden Drahtgitter in Prothesenplatten eingelegt, was jedoch die Festigkeit des Kunststoffes, wie MATTHES nachwies, herabsetzte, da es die fortlaufende Molekularstruktur schwächte. 1950 stellte BAUER der üblichen Polymerisationsart im kochenden Wasserbad die Langzeit-Tieftemperatur-Polymerisation (LTP- Verfahren) oder Wärmeschränkmethode gegenüber und erhielt Dauerfestigkeitswerte. JANKE brachte 1953 das von ihm entwickelte Einpress- Nachpress-Gerät heraus und erzielte außer größerer Festigkeit eine geringere Porosität und größere Spannungsfreiheit. Die Kombination beider Verfahren erbrachte erheblich verbesserte Dauerfestigkeitswerte als bei den üblichen Herstellungsverfahren. ( FILLINGER, JANKE, MORITZ, STIEBELING )

JANKE kam bei vergleichenden Untersuchungen über das Festigkeitsverhalten homogener und inhomogener Kunststoffe zu dem Schluß, daß inhomogene Kunststoffe u.U. sogar höhere Maximalfestigkeiten aufweisen als homogene, jedoch regelmäßig schlechtere Werte bei Langzeitprüfungen erbrachten, was PAULY in seiner Arbeit zwar experimentell bestätigen konnte, ein genaues Festigkeitsmaximum wurde durch seine Werte jedoch nicht erbracht.

Er vermutete es anhand seiner Kurve bei ca.  $1 \frac{3}{4}$  h Vorbelastungszeit.

Aufgabe dieser Arbeit soll es sein, das Festigkeitsmaximum für vorbelastete Prüfkörper aus Paladon 65 genauer zu bestimmen.

## B. HAUPTTEIL

### I. Werkstoffkundliche Untersuchungen an Kunststoffen

Da an einen dentalen Kunststoff eine Vielzahl von Anforderungen in Bezug auf seine physikalisch-chemischen Eigenschaften gestellt werden, benötigt die werkstoffkunde eine ebensolche Vielzahl an Untersuchungen, um einen Kunststoff zu charakterisieren, und somit eine Aussage über seine Brauchbarkeit auf dem dentalen Sektor machen zu können.

Am Anfang der werkstoffkundlichen Kunststoffuntersuchungen griff man auf die Prüfmethoden von Metallen zurück.

Es wurden Härteprüfungen mit der Ritzmethode (Shore) und mit der Kugeldruckmethode (Brinell), Schlagbiegeversuche und Zugbelastungsversuche durchgeführt.

Wie bei den Metallversuchen üblich, führte man zuerst nur Prüfungen von Kurzzeitbelastungen durch.

JANKE war schon 1956 der Auffassung, daß Kurzzeitfestigkeitsprüfungen alleine nicht in der Lage sind, den wahren Charakter der Kunststoffe anzuzeigen. Es fehlten noch zusätzliche Aussagen über die Auswirkungen der verschiedensten Belastungen, gemessen über eine Zeitdauer.

## a. Biegeversuche

Den Untersuchungen über statische Biegefestigkeit (APPENZELLER), bei denen die Durchbiegung bei verschiedenen vorgegebenen Belastungen gemessen wurden, folgten Wechselbiegeversuche, welche eine adäquatere Prüfungsform darstellten, da eine Prothese beim Kauvorgang hauptsächlich Dauerbiege-, Zug- und Wechselbiegebelastungen ausgesetzt ist. (SCHWIEKERATH, VOB, UHLIG, HERRMANN, RITZE, STRACK)

Aus den Wechselbiegeversuchen konnten für den Kunststoff wichtige Aussagen über sein Elastizitätsverhalten gemacht werden.

Die Erhaltung des Kieferkammes wird mit einer starren Prothese besser erreicht als mit einer flexiblen, weswegen eine möglichst große Steifigkeit der Prothese anzustreben ist. (VOB)

Da man den Zungenraum nicht beliebig einengen kann, ist man mit der Wahl der Materialstärke an eine Grenze gebunden. Die Steifigkeit hängt also jetzt nur noch von einer Materialkonstanten, dem Elastizitätsmodul, ab. Je größer das Elastizitätsmodul ist, um so besser ist also das Prothesenmaterial geeignet.

Das E-Modul ist eine Materialkonstante, die für Belastungen im "Hookeschen Bereich" Gültigkeit besitzt. Dieser Bereich ist dadurch charakterisiert, daß an-

greifende Kräfte eine Verformung bewirken, die den Kräften proportional sind und nach Entlastung vollständig zurückgehen.

Das Elastizitätsmodul der üblichen Prothesenbasismaterialien auf Polymethacrylat-Basis beträgt etwa  $250 \text{ kg/mm}^2$ . (VOß, SCHWIEKERATH)

Als Vergleich sei das Elastizitätsmodul der Chrom-Kobalt-Legierung von  $20\,000 \text{ kg/mm}^2$  angegeben.

Da eine Reihe von Dauerbiegeprüfungen von EICHNER, UHLIG, REHBERG, RITZE zu Widersprüchen führte, erkannte SCHWIEKERATH, daß man mit " ungeeigneten Prüfanordnungen unvergleichbare Werte miteinander verglichen hatte" (Voß), und entwickelte eine geeignete Dauerschwellenbelastungsmaschine und empfahl die Aufzeichnung der Wöhler-Kurven.

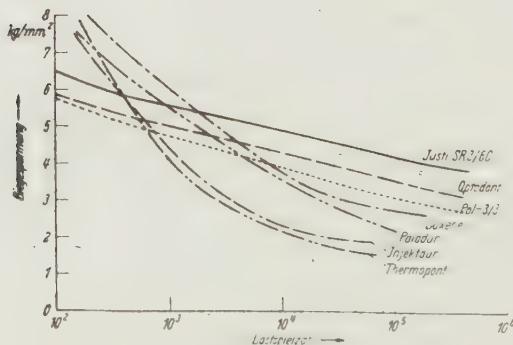


Abb. 7. Wöhler-Kurven der Dauerschwellenfestigkeitswerte verschiedener Kunststoffe

## b. Zugfestigkeit

Die Zugversuche dienen zur Ermittlung der Zugfestigkeit bei bestimmten Zugbeanspruchungen. Darüberhinaus ermöglichen sie die Erfassung der elastischen und bleibenden Formänderungen sowie der Arbeitsaufnahme.

### 1. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve

Als Zugfestigkeit bezeichnet man im allgemeinen die im Laufe des Zerreivorgangs auftretende Höchstlast, dividiert durch den Anfangsquerschnitt der Probe, als Zerreißfestigkeit die im Augenblick des Bruches gemessene Last, dividiert durch den Anfangsquerschnitt. Die Dehnung wird auf die ursprüngliche Meßlänge bezogen, die im Augenblick des Bruches gemessene Dehnung wird als Bruch- oder Zerreidehnung bezeichnet. Um einen Stoff genügend charakterisieren zu können, zeichnet man den gesamten Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve auf.

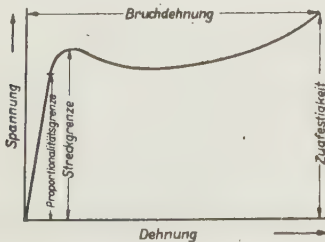


Abb. 323.  
Schematische Spannungs-Dehnungskurve.

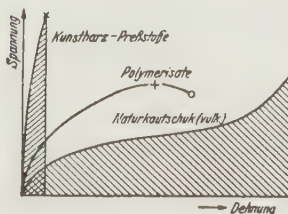


Abb. 324.  
Spannungs-Dehnungs-Schaubilder.

Die Kurve zeigt, daß am Anfang die Dehnung proportional der Spannung ansteigt. Wird die Proportionalitätsgrenze überschritten, so zeigt die Kurve ein Knie, welches als Fließgrenze oder Streckgrenze bezeichnet wird. An dieser Grenze beginnt das Material zu fließen, daß heißt, die Proben verlängern sich, ohne daß die Spannung ansteigt. Die Spannung kann unter Umständen sogar abfallen. Es folgt ein Gebiet des weiteren Spannungs- und Dehnungsanstieges bis zum Eintritt des Bruches. Bis zum Fließpunkt sind die Deformationen mindestens zum großen Teil rückgängig. Sie sind ein Maß für die elastische Deformation. Die Dehnung vom Fließpunkt zum Bruch ist nicht reversibel und ein Maß der plastischen Deformation.

## 2. Die Zeitstandsfestigkeitslinie

Unter Zeitstandsfestigkeit eines Kunststoffes versteht man die Zeitspanne, nach der ein unter bestimmten Bedingungen ständig konstant belastetes Material zu Bruch geht.

Um eine Zeitstandsfestigkeitslinie aufzustellen, benötigt man eine große Anzahl identischer Prüfkörper, die unterschiedlichen Zugbelastungen unterworfen werden. Es wird die Zeit bis zum Eintritt des Bruches gemessen und in ein Kraft-Zeit- Diagramm die Kraft in linearer

Einteilung auf der Ordinate, die Zeit in logarithmischer Einteilung auf der Abszisse aufgetragen.

Man erhält eine mehr oder weniger abfallende Gerade oder ein Band, die Zeitstandfestigkeitslinie.

Aus ihr lassen sich Rückschlüsse auf das mechanische Verhalten der Kunststoffe ziehen. Die Zeitstandsfestigkeitslinie ist also eine analoge Kurve zur Zeitwechselbiegefestigkeitslinie oder Wöhler-Kurve bei der Wechselbiegebelastung.

### c. Die Festigkeit des Kunststoffes und der Bruch

Unter der Festigkeit versteht man den Widerstand, den ein Stoff der Trennung durch eine mechanische Kraft entgesetzt.

Die Festigkeit eines Kunststoffes wird u.a. durch seinen molekularen Aufbau bestimmt.

In Kunststoffen finden sich kleine Moleküle, die Grundbausteine, durch Valenzbindungen zu Ketten verkoppelt, die den Raum dicht ausfüllen. Auch zwischen den Ketten bestehen gegebenenfalls chemische Verkopplungen, so daß mehr oder weniger enge Netzwerke vorliegen.

Das einzelne Kettenstück hat meist unregelmäßige Form. Man sagt, es ist statistisch lose geknäult.

Die dichte Raumerfüllung kommt dadurch zustande, daß diese losen Knäule sich durchdringen, ineinanderstecken.

Die Kräfte zwischen den Kettenstücken können jedoch verursachen, daß durch Streckung von Kettenteilchen auch eine teilweise gitterähnliche Lagerung entsteht. Man unterscheidet demgemäß unvernetzte und vernetzte Kunststoffe, amorphe und partiell-kristalline Hochpolymere. (Zitat F.H.MULLER )

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften werden in erster Linie durch die Nebenvalenzen bewirkt, die die Kettenmoleküle miteinander räumlich verbinden. Unter mechanischer Einwirkung kommt es zu einer Auflockerung des Molekulargefüges, indem eine Trennung der Nebenvalenzen stattfindet. Die Molekülketten entschlingen sich und gleiten aneinander vorbei. (" Auseinanderzerren der Wattebauschstruktur" JANKE, HENKEL, DOLDER )

Dieser Vorgang wird auch als "flow" bezeichnet. Ist die einwirkende Kraft genügend groß oder ihre Einwirkungszeit genügend lang, so kommt es zur Trennung der Strukturen, was sich zuerst als Reißbildung und später als Bruch zeigt.

Es stellt sich die Frage, an welcher Stelle der Probe es zum Bruch kommen wird.

Für die Reißbildung sind hauptsächlich die Schwachstellen verantwortlich, das heißt, daß in jedem Körper zahlreiche

Inhomogenitäten (verursacht durch Fremdteilchen, submikroskopische Hohlräume, Schwankungen der Anordnung benachbarter Molekülketten etc. oder auch wirkliche Risse oder Einkerbungen) vorhanden sind, die die Festigkeit des Materials in submikroskopischen Bereichen herabsetzen, also wie Schwachstellen oder Mikrokerbstellen wirken. Überschreitet dabei die örtliche innere Spannung einen bestimmten Wert, so kann ein Reißbildungs- bzw. Bruchvorgang eingeleitet werden. (FISCHER)

Da diese Schwachstellen überall in der Probe vorkommen, kann es an jeder Stelle zum Bruch kommen. PAULI zeigte, daß die Reißstellen der Proben über der Einspannstrecke statistisch verteilt waren.

Aus dieser Tatsache ergibt sich, daß für Festigkeitsprüfungen eine große Anzahl Probekörper benötigt werden, um eine genügende statistische Breite zu erhalten.

## II. Eigene Versuche

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Prüfung der Kurzzeitfestigkeit des Dentalkunststoffes Paladon 65 nach unterschiedlichen Vorbelastungen.

### a. Die Prüfkörper und ihre Herstellung

Als Ausgangsform für die Prüfkörper dienten aus Messing hergestellte Stäbe, deren Abmessung und Form sich nach DIN 53 504 richteten. Um mit Kunststoffprothesen vergleichbare Materialstärken zu untersuchen, wurde der kleinste Normstab S3 (Dicke bis höchstens 3 mm) ausgewählt.

|                 |        |                         |       |
|-----------------|--------|-------------------------|-------|
| A = Gesamtlänge | 50 mm  | E = Übergangshalbmesser |       |
| B = Breite der  |        | innen                   | 10 mm |
| Köpfe           | 8,5 mm | F = Übergangshalbmesser |       |
| C = Länge des   |        | außen                   | 0 mm  |
| Steges          | 15 mm  | Lo = Messlänge          | 10 mm |
| D = Breite des  |        | Dicke des Prüfkörpers   |       |
| Steges          | 4 mm   | höchstens               | 3 mm  |

### 3.1.2. Normstäbe

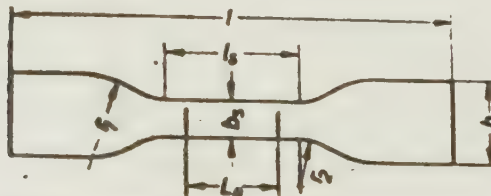


Bild 2. Normstäbe

Am Übergang zu den breiteren Enden waren auf jeder Seite Gewinde eingeschnitten, die zum Einbetten in die Kuvette mit Wachs ausgefüllt wurden. Eingebettet wurde mit Hartgips. Nach Aushärtung des Gipses wurde dieser mit herkömmlicher Isolierlösung auf Alginatbasis isoliert und der Konter aus einer Mischung von Alabaster und Hartgips hergestellt.



Bild 4

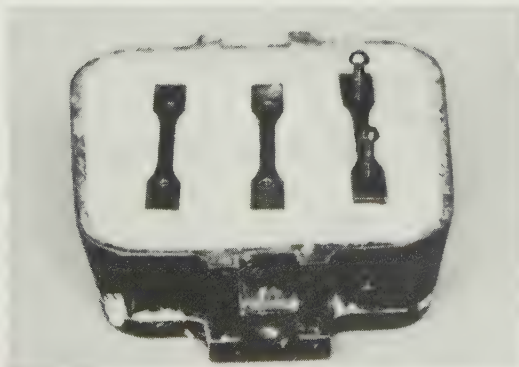


Bild 5

Nach dem Trennen der beiden Küvettenhälften wurde das Wachs mit heißem Wasser aus den Gewinden ausgebrüht. Durch gleichzeitiges Eindrehen von zwei Schrauben wurden die Metallstäbe vorsichtig parallel aus dem Gips herausgehoben. Anschließend wurde erneut isoliert und mit Kunststoff gestopft.

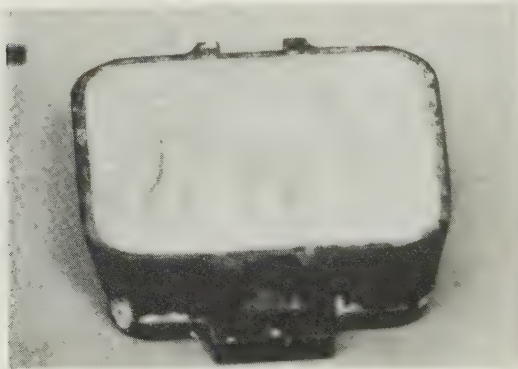
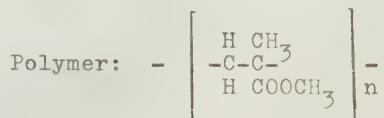
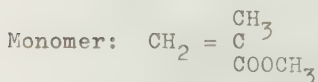


Bild 6

# 1. Anteigen des Kunststoffes

Der Kunststoff Paladon 65, aus welchem die verwendeten Prüfkörper hergestellt wurden, ist ein vernetztes Methakrylsäureester-Copolymerisat auf Pulver- und Flüssigkeitsbasis.



Das Anteigen des Kunststoffes richtete sich genau nach den Angaben des Herstellers. 3,5 Volumenteile Polymer (Pulver) wurden mit 1 Volumenteil Monomer (Flüssigkeit) vermischt. Nachdem der Teig in einem Porzellengefäß gut durchgearbeitet worden war, konnte er abgedeckt 5-7 Minuten anquellen, um anschließend in die Form gestopft zu werden. Es wurde mit Überschuß gestopft und mit Kunststoffolie zwischen-gepreßt. Um den überschüssigen Kunststoff abfließen zu lassen, wurde langsam und intervallartig gepreßt.

## 2. Polymerisation

Die Proben wurden im Wasserbad im Praxipool-Gerät im Langzeitverfahren polymerisiert.

Die Küvette wurde in ca. 10 Litern Wasser langsam in 90 Minuten auf 70°C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde für fünf Stunden konstant eingehalten und danach durch erneutes Aufheizen auf 100°C gebracht, welche über die Dauer von 45 Minuten konstant gehalten wurden. Dieses Kochen stellte die Endpolymerisation dar. Nach Abschluß dieses 45 minütigen Kochvorgangs schaltete das Gerät automatisch ab. Die Küvette wurde erst nach Abkühlung auf Raumtemperatur entnommen und die Prüfkörper ausgebettet.

### 3. Ausarbeitung

Die Freßfahnen und eventuell vorhandene Perlen wurden mit der Kunststofffräse entfernt, anschließend die Stärke der Prüfkörper mit Naßschleifpapier unter fließendem Wasser auf 2,5 mm heruntergeschliffen und die Oberfläche mit Bimssteinpulver und Schlämmkreide auf Hochglanzpolitur gebracht.

Bei allen Ausarbeitungsvorgängen wurde darauf geachtet, daß soweit wie möglich jede Hitzebildung vermieden wurde.

Auf diese Weise wurden ca. 200 Prüfkörper hergestellt und in Ringerlösung aufbewahrt.

Die Prüfkörper wurden unter den gleichen Bedingungen hergestellt wie eine Kunststoffprothese, denn die zahnärztlichen Werkstoffprüfungen müssen den Verhältnissen im Munde und dem Material adaequat sein, um Vergleiche anstellen zu können.(STRACK)

#### b. Die Vorbelastung der Prüfkörper

Die Vorbelastung der Prüfkörper erfolgte am zweckmäßigsten in einem Zeitstandsprüfgerät.

Dieses Gerät besteht aus einer mit Styropor wärmeisolierten rechteckigen Wanne aus nichtrostendem Stahl. Eine mit einem Thermostaten gekoppelte Heizvorrichtung hielt die

in der Wanne befindliche Ringerlösung <sup>1)</sup> konstant auf  $37^{\circ}\text{C}$  (  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  ). In die Wanne taucht ein Stahlgestell ein, in welchem die Einspannklemmen mit den Kunststoffproben befestigt werden können. Diese Teile sind ebenso aus rostfreiem Material hergestellt.

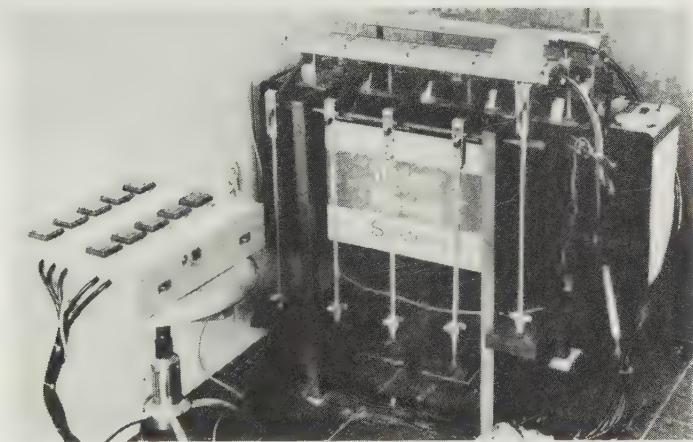


Bild 7

Die Belastung der Prüfkörper erfolgt über eine Hebelübersetzung von 1:4. In diesem Gerät können 10 Proben gleichzeitig belastet werden.

1) Ringerlösung nach Rein/Schneider: 0,8% NaCl, 0,02% KCl, 0,02%  $\text{CaCl}_2$ , 0,1%  $\text{NaHCO}_3$ , aqua dest. ad 100 .

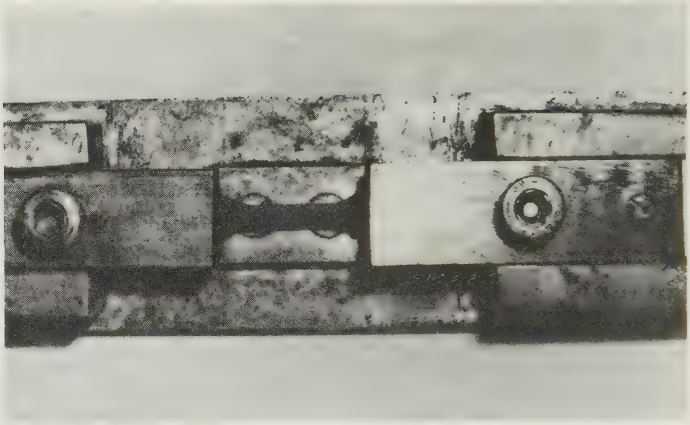


Bild 8

Eine Einspannlehre ermöglicht ein gleichmäßiges und verkanntungsfreies Einspannen der Proben.

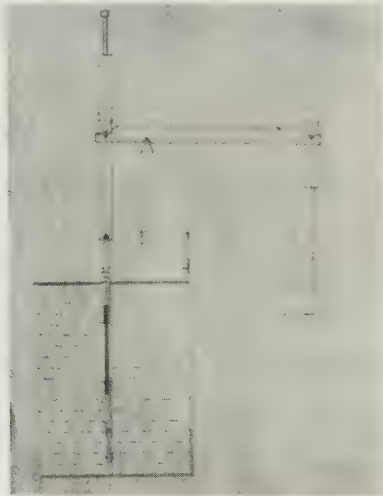


Bild 9

Die Proben befinden sich nach Einbringen in das Gerät etwa in der Mitte der Flüssigkeit.

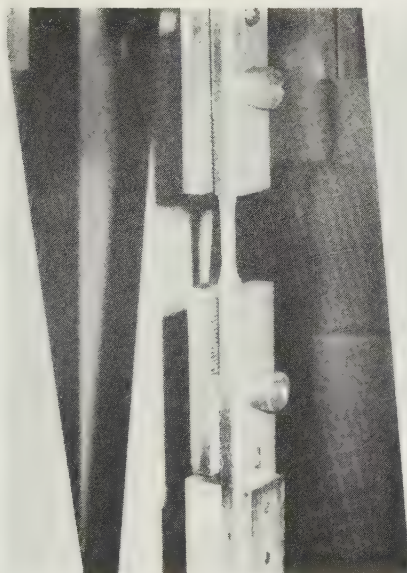


Bild 10

Die Last wird mittels Exzenternocke stoßfrei und gleichmäßig aufgebracht und entfernt.

Da es durch die Herstellungsart bedingt nicht möglich war, alle Prüfkörper gleich stark zu machen, wurden diese nummeriert und vermessen, um alle später erhaltenen Werte auf das Standartmaß von 2,5 mm x 4,0 mm umrechnen zu können. Nach DIN 53 455 errechnet sich die Zugfestigkeit aus dem Quotienten der gemessenen Höchstkraft und dem Anfangsquerschnitt der Probe. ( $\text{Kp/cm}^2$ )

Aus der von PAULY ermittelten Zeitstandsfestigkeitslinie für Paladon 65 ergibt sich eine Belastung von 22 kp. Die Belastungszeit wurde variiert.

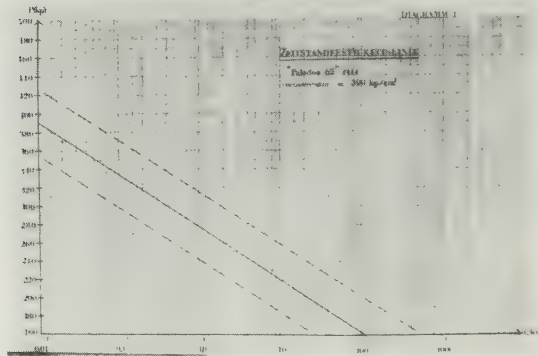


Bild 11 (PAULY)

es wurden fünf Versuchsserien mit je 30 bis 40 Proben durchgeführt: unbelastet, 30 Minuten belastet, 60 Minuten belastet, 90 Minuten belastet, 120 Minuten belastet.

Bei der Vorbelastung zerbrachen sieben Proben vorzeitig. Anschließend wurden die Probekörper wieder in Ringerlösung aufbewahrt.

## c. Die Zugfestigkeitsprüfung +)

### 1. Die Prüfmaschine

Die Zugfestigkeitsprüfung wurde mit der Universal-Prüfmaschine RK 1000 von ROELL u. KORTHAUS durchgeführt. Es ist eine elektronisch gesteuerte Zug- und Druckprüfmaschine für kleine Belastungen in Einraumbauweise. Sie besteht aus einem Lastteil, einem Steuerteil und einem Meßteil.

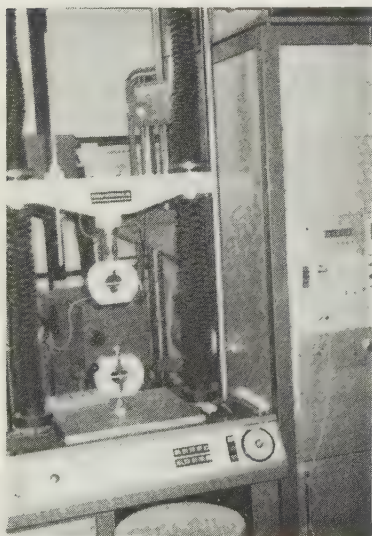


Bild 12

#### Der Lastteil:

Eine Basisplatte trägt die Spindellagerung mit Spindel und Traverse, sowie die Stützsäulen und eine Arbeitsplatte. Die Einspannvorrichtung für die Proben kann mittels einer Endschalterstange mit verstellbaren Anschlagringen nach jedem Versuch wieder in den gleichen Ausgangsabstand gebracht werden.

+) Die Versuche wurden im Institut für Polymere des Fachbereichs Physikalische Chemie der Philipps Universität Marburg, Leit.Dir. Prof.Dr. F.H.Müller, durchgeführt.

Der Steuerteil:

Durch diesen Teil lassen sich mit Drucktasten Fixgeschwindigkeiten einstellen für die Zuggeschwindigkeit. Ein Drehpotentiometer ermöglicht zusätzlich eine stufenlose Regelung.

Der Meßteil:

Das Kernstück des Meßteils ist eine Dehnungsstreifen-Kraftmeßdose. Diese wird von einer hochstabilen Gleichstromquelle gespeist, und der Ausgang der Meßdose ist an einem Kompensationsschreiber angeschlossen. Die Kraft wird dabei auf der Y-Achse des Schreibers angezeigt. Durch einen Schalter können sechs Kraftmeßbereiche gewählt werden.

## 2. Die Ermittlung der Zuggeschwindigkeit $V_p$ (mm/min)

Die genaue Zuggeschwindigkeit wurde über die Wegmessung ermittelt. Zur Wegmessung dient ein an der Belastungsspindel angebautes Wendelpotentiometer. Es überträgt auf die Y-Achse des Schreibers ein elektrisches Signal, das proportional der Traversenposition ist. Nun werden mit Hilfe der Fixgeschwindigkeiten die Weg-Zeit-Kurven

für  $V_p = 100 \text{ mm/min}$ ,  $V_p = 200 \text{ mm/min}$ ,  $V_p = 500 \text{ mm/min}$ ,  
 $V_p = 1000 \text{ mm/min}$  aufgezeichnet, und aus ihnen der  
Anstieg  $\tan \alpha$  ermittelt. Die  $\tan \alpha$  -Werte wurden gegen  
die zugehörigen Geschwindigkeiten in einem Diagramm  
aufgetragen. Aus der ermittelten Geraden ließ sich  
anhand des  $\tan \alpha$  -Wertes in dem Diagramm die bei den  
Zugversuchen zu verwendende Zuggeschwindigkeit ablesen,  
und durch vergleichsweise angefertigte Weg-Zeit-Kurven  
am stufenlosen Bereich für die Einstellung der Zug-  
geschwindigkeit am Steuerteil der Prüfmaschine ein-  
stellen.

#### d. Ergebnisse der Versuche

Die Universal-Prüfmaschine wurde vor Beginn der Versuche  
eingestellt und geeicht.

Die Ermittlung der Zuggeschwindigkeit wurde bereits  
beschrieben.

Für die Untersuchung der vorbelasteten Prüfkörper  
wurde ein Meßbereich von 100kp ausgewählt, da nach  
der von PAULY ermittelten Zeitstandsfestigkeitslinie  
eine Maximalfestigkeit von  $390 \text{ kp/cm}^2$  und bei unseren  
Prüfkörpern mit einem Querschnitt von ca.  $1/10 \text{ cm}^2$   
eine Maximalzugfestigkeit von 39 kp zu erwarten war.  
Zur Eichung der Universal-Prüfmaschine wurde ein an

sie angeschlossener Kompensationsschreiber (KIPP u. ZONEN) benutzt.

In die Probenhalterung wurde ein Gewicht von 5 kp eingespannt und der dazugehörige Ausschlag des Kompensationsschreibers markiert und ausgemessen. Der Schreiber war dafür auf 10 V für den Vollausschlag und auf die Papiergeschwindigkeit 500 mm/min eingestellt.

Um den Abstand der Probenhalterung für alle Versuche gleich zu halten, wurde er auf der Universal-Prüfmaschine auf 24 mm fest eingestellt. Die Proben wurden so eingespannt, daß ihre Längsachse in Zugrichtung lag. Auf diese Weise wurden fünf Versuchsserien mit je etwas über 30 Probekörpern durchgeführt.

Diese wurden bis unmittelbar vor dem Versuch in Ringerlösung aufbewahrt.

Die zum Zerreißen erforderliche Kraft wurde auf dem Schreiber aufgezeichnet und mit Hilfe der vorher vorgenommenen 5 kp-Eichung ausgemessen.

Als erstes wurde die Prüfung der unvorbelasteten Probekörper durchgeführt. ( Siehe Anhang Tabelle 1 )

Der Mittelwert dieser Serie beträgt  $374,6 \text{ kp/cm}^2$  .

Bei den Proben mit 30 minütiger Vorbelastung ergab sich der bedeutend höhere Wert von  $406,5 \text{ kp/cm}^2$  .

( Siehe Anhang Tabelle 2 )

Die 60 Minuten vorbelasteten Probekörper ergaben bei der Prüfung einen noch höheren Wert für die Maximalfestigkeit  $422,9 \text{ kp/cm}^2$  als die 30 Minuten vorbelasteten.

( Siehe Anhang Tabelle 3 )

Die folgende Serie mit der Vorbelastungszeit von 90 Minuten ergab einen Mittelwert von  $412,8 \text{ kp/cm}^2$ , der unter dem der vorherigen Serie lag. ( Siehe Anhang Tabelle 4 )

Die 120 Minuten vorbelasteten Proben zeigten im Mittelwert  $389,3 \text{ kp/cm}^2$  und damit wieder annähernd den Wert der unbelasteten Prüfkörper. ( Siehe Anhang Tabelle 5)

Die größte Maximalfestigkeit besitzt somit die Versuchsseriemit den Proben, die 60 Minuten vorbelastet waren.

#### e. Diskussion der Versuchsergebnisse

Um die erhaltenen Werte besser zu veranschaulichen, wird zuerst von jeder Versuchsreihe der arithmetische Mittelwert gebildet. In einem Diagramm werden die Mittelwerte der Reißspannungen gegen die Vorbelastungszeit aufgetragen. Es zeigt sich folgendes Bild: Eine Erhöhung der Reißspannung mit steigenden Vorbelastungszeiten. Die mit einer halben Stunde vorbelasteten Proben zeigen eine Erhöhung der Reißspannung um 8%. Bei einer Vorbelastungszeit von einer Stunde zeigt

sich ein eindeutiges Maximum mit einer Erhöhung der Reißspannung um ca. 13%. Bei weiter zunehmenden Vorbelastungszeiten fällt die Kurve wieder ab.

( Siehe Anhang Diagramm 2 )

Trägt man in dieses Diagramm die von PAULY in seiner Arbeit gefundenen Werte ein, so wird das hier ermittelte Ergebnis nur bestätigt. Die Werte von PAULY passen exakt in dieses Kurvenbild. Das Maximum der Kurve liegt, wie von PAULY vermutet, links neben dem von ihm gefundenen Höchstwert.

An Hand des nun ermittelten Maximumswertes kann man mit Recht von einem Kurvenbild sprechen, welches einem " Gotischen Bogen " ähnelt .(JANKE)

JANKE beschäftigte sich bereits 1956 in seiner Habilitationsschrift eingehend mit dem Problem der Lang- und Kurzzeitfestigkeit von Kunststoffen verschiedener Inhomogenitätsgrade. Die von ihm untersuchten Inhomogenitätsgrade liegen zwar erheblich höher als die der Prüfkörper dieser Arbeit, die von ihm erhaltenen Festigkeitskurven zeigen jedoch erstaunliche Ähnlichkeit mit der hier ermittelten Kurve.

Zum Phänomen des "gotischen Bogens":

BUCHMANN verwendete für Festigkeitsprüfungen an Polyvinylchlorid stabförmige Prüfkörper, die einmal glatt, zum anderen mit zirkulären Flachkerben, Spitzkerben und Rundkerben versehen waren, um verschiedene Inhomogenitäten darzustellen.

JANKE kommt nach Vergleichen der von BUCHMANN gefundenen Werte und von ihm ermittelter Werte nach Auftragen derselben gegen die Zeit in ein Koordinatensystem in logarithmischer Aufteilung zu dem Schluß, daß sich die Charakteristika vom homogensten Zustand bis zu demjenigen inhomogenen Zustand, der das Festigkeitsmaximum ergibt, zwischen dem Kurzzeit- und dem Langzeitbereich kreuzen. Daraus folgert er weiter, daß inhomogene Proben einen stärkeren Festigkeitsabfall aufweisen, jedoch im Kurzzeitbereich höhere Festigkeitswerte ergeben.

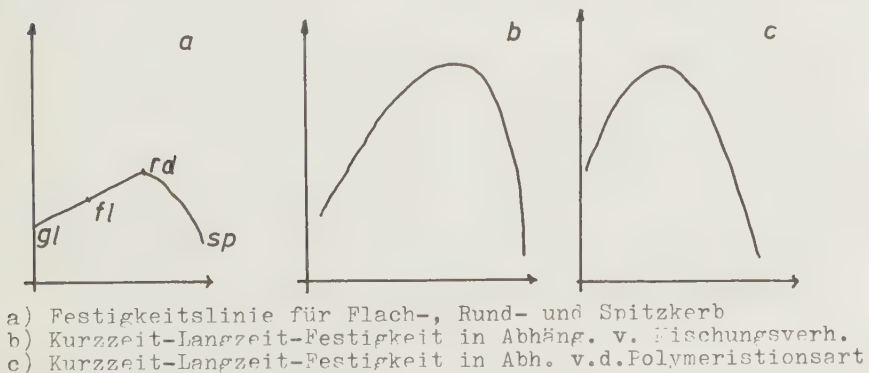


Bild 13 (nach JANKE)

Da die Proben bei den Vorbelastungen keine großen Deformationen erfahren haben, kann man nicht von einer makroskopischen Orientierung sprechen. Es treten aber Platzwechsel-(Relaxations-)mechanismen innerhalb der Kette auf, die offensichtlich in Richtung der angelegten Vorspannung bei kleinen Belastungszeiten zu einer Verfestigung des Materials führten. Bei weiter steigenden Vorbelastungszeiten (1h u. mehr) verringert sich die Reißfestigkeit, um bei sehr langen Zeiten noch unter die Werte der unvorbelasteten Proben zu sinken.

Eine Erklärung dieses Phänomens wäre nur durch Strukturänderungen im molekularen Bereich möglich.

Eine molekulare Erfassung der Platzwechselmechanismen würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Kristallisationen, die im allgemeinen zu einer Verfestigung des Materials führen, treten gewöhnlich aber erst bei großen Deformationen auf (200-500%). Bei den hier vorliegenden Deformationen ist Kristallisation unwahrscheinlich. PAULI untersuchte seine Proben auf Deformation und Kristallisation und konnte eine Deformation von ca. 4% ermitteln, sowie zeigen, daß keine Kristallisationen vorliegen.

Als Ergebnis dieser Arbeit zeigt sich demnach auch, wie irreführend es ist, wenn von der Industrie zur Charakterisierung eines neuen Dentalkunststoffes allein auf einen Maximalfestigkeitswert verwiesen wird. Dieser Wert allein kann keine Aussage über die Brauchbarkeit eines Dentalkunststoffes machen. Es werden zusätzlich Dauerfestigkeitswerte benötigt.

Ausblick auf die Anwendung als prothetisches Material:

Eine Prothese (Totaler Ersatz) wird beim Kauakt dreidimensional beansprucht. Bei den durchgeführten Versuchen erfolgten jedoch nur uniaxiale Beanspruchungen.

Es wäre interessant, wenn nachgeprüft würde, wie sich die Reißspannung senkrecht zur Vorbehandlungsrichtung als Funktion der Vorbehandlungszeit ändert.

### C. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Prüfung der Kurzzeitfestigkeit eines Dentalkunststoffes nach unterschiedlichen Vorbelastungen. Untersucht wurde Paladon 65.

Im einzelnen sollten die von PAULY gefundenen Werte bestätigt, und das von ihm gefundene Phänomen näher untersucht werden.

Die grundsätzliche Fragestellung stammt von JANKE, der bei inhomogenen Proben höhere Kurzzeitfestigkeiten ermitteln konnte als bei homogenen.

Einleitend wurde auf die Bedeutung der verschiedenen werkstoffkundlichen Kunststoffuntersuchungen hingewiesen und die einzelnen wichtigsten Methoden kurz erläutert.

Zur Durchführung der Versuche, die fünf Serien umfaßte, wurden für jede Serie 30 bis 40 Probekörper nach gleichen Verfahren angefertigt. Vier Serien wurden in einer Zeitstandsfestigkeitsmaschine unterschiedlich lange dauernden Vorbelastungen unterworfen, deren Größe von PAULY mit Hilfe einer von ihm angefertigten Zeitstandsfestigkeitslinie mit 22 kp ermittelt wurde.

Die Proben wurden 30 Minuten, 60 Minuten, 90 Minuten,

und 120 Minuten vorbelastet. Die Belastung erfolgte in Ringerlösung bei 37°C.

Anschließend wurden sowohl die unbelasteten als auch die belasteten Prüfkörper mit Hilfe der Universal-Prüfmaschine nach ROELL u. KORTHAUS Kurzzeitfestigkeitsprüfungen unterzogen, wobei die Reißspannung (=Maximalfestigkeit) registriert wurde.

Es ergaben sich folgende Werte:

Die unvorbelasteten Proben zeigten eine Reißspannung von 374,6 kp/cm<sup>2</sup>. Die Prüfkörper mit 30 minütiger Vorbelastungszeit erzielten einen um 8% höheren Wert (406,5 kp/cm<sup>2</sup>) als die unvorbelasteten. Bei der Versuchsserie mit 60 minütiger Vorbelastungszeit konnte ein um 13% höherer Wert ermittelt werden. (422,9 kp/cm<sup>2</sup>)

Bei 90 minütiger Vorbelastung erniedrigte sich der Wert der Reißspannung auf 412,8 kp/cm<sup>2</sup>, um bei 120 Minuten sogar mit 389,3 kp/cm<sup>2</sup> fast den Wert der unvorbelasteten Proben zu erreichen. Die größte Reißspannung zeigt somit die Versuchsserie mit 60 Minuten Vorbelastung.

Bei graphischer Darstellung, bei welcher die Reißspannung gegen die Vorbelastungszeit aufgetragen wird, zeigt sich eine Kurve, die einem "Gotischen Bogen" (JANKE) ähnelt.

Dieses Phänomen wurde andeutungsweise mit Hilfe von Platzwechselmechanismen in den Molkülketten zu erklären versucht.

## D. LITERATURVERZEICHNIS

## 1. Verzeichnis der in der Arbeit genannten Autoren

- |                                |                                                                                                            |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| APPENZELLER, M.:               | Materialprüfungen an neuen<br>Zahnprothesenkunststoffen.<br>SMfZ 1946 Nr.6                                 |
| BAUER, W.:                     | Die Methacrylära in der<br>Zahnheilkunde.<br>DZZ 4.Jg.H.18                                                 |
| BUCHMANN :                     | Eigenschaften von Poly-<br>vinylchlorid-Kunststoff<br>Verlag J.F.Lehmann<br>München-Berlin 1944            |
| DEUTSCHER NORMEN-<br>AUSSCHUß: | Prüfung und Herstellung<br>von Kunststoffen.<br>DIN 53 451<br>DIN 53 452<br>DIN 53 455<br>DIN 53 504       |
| DOLDER, E.:                    | I Physikalische Werkstoffprüfungen<br>an Zahnprothesen im Labor und<br>am Patienten.<br>SMfZ 1943/ 53/ 535 |

DOLDER, E.:

II Neue Werkstoffprüfungen an

Prothesenkunststoffen.

SMfZ 1945/ 55/ 6

III Neue Untersuchungen an

Kunststoffen.

SMfZ 1946/ 56/ 748

EICHNER, K.:

Leitfaden zahnärztlicher Werkstoff-  
kunde und ihrer Verarbeitung.

Berlinische Verlagsanstalt 1967

FISCHER, F.:

Spannungsrißkorrosion bei

Polystyrol.

Kunststoffe Jg. 55, 1965 H6

FILLINGER, K.H.:

Dauerbiegefestigkeitsprüfungen  
von Paladon in Abhängigkeit von  
verschiedener Verarbeitung.

Diss. Marburg 1959

HAEFELI, M.:

Aufbau und Eigenschaften von  
Dentalkunststoffen.

SmfZ 1947/ 57/ 779-905

- HENKEL, G.:                      Ausgewählte Kapitel aus der Technologie zahnärztlicher Kunststoffe. Stoma Jg.48 H1
- HERRMANN, W.:                    Prüfung der Dauerbiegefestigkeit von Prothesenkunststoffen. ZM 1967 Nr.17
- JANKE, G.:                        I Probleme der Kunststofftechnik. DZZ 1953/ 4/ 1159
- II Die Abhängigkeit der Protheseneigenschaften von der Laborverarbeitung. DZZ 1955/ H21/ 1437
- III Über die Festigkeit zahnärztlicher Kunststoffe in Abhängigkeit von der Verarbeitung. Habil. Schrift Marburg 1956
- MATHES, H.:                        Drahtgittereinlagen in Paladon. Diss. Marburg 1951
- MORITZ, K.:                        Heißluftpolymerisation von Paladon bei 3 atü Druck und Temperaturen von 110°-160°C in Metall und Gipsform. Diss. Marburg 1955

MÜLLER, F.H.:

I Die Eigenschaften von Kunststoffen  
in Abhängigkeit von ihrer Vorgeschichte.  
Kunststoffe Jg.51/ H9/ 1961

II Bleibende physikalische Veränderungen  
hochpolymerer Stoffe und deren Prüfung.  
Kunststoffe Jg.49/ H11/ 1959

PAULY, J.:

Kurzzeitfestigkeit des Dentalkunst-  
stoffes Paladon 65 unter länger-  
dauernden Vorbelastungen.  
Diss. Marburg 1974

RITZE, H.:

Untersuchungen von autopolymeri-  
sierenden Prothesenkunststoffen.  
Dentallabor 13.2./45-52/ 65

REHBERG, H.J.:

Ergebnisse von Untersuchungen  
über Kunststoffverarbeitung.  
ZR 1955, H10

SCHWIEKERATH, H.:

I Für Materialprüfung unbrauchbar.  
ZM Nr.23 1967

II Versuchsanordnung ungeeignet.  
ZM Nr. 19 1967

SCHWIEKERATH, H.:

III Vorschlag zur Feststellung der  
Biegefestigkeit von Prothesen-  
kunststoffen.

ZM Nr.11 1967

IV Die elastischen Eigenschaften  
der Methacrylate.

DZZ 6/ 470/ 1961

V Zur Frage der Werkstoffprüfung.

ZW 68/ 520-525/ 1967

STRACK, R.:

Für und wider den Kunststoff.

DZZ 1947 H4/5, 7/8

STIEBELING, G.:

Über die Dauerbiegefestigkeit  
zahnärztlicher Kunststoffe in Ab-  
hängigkeit von ihrer Verarbeitung.  
Diss. Marburg 1956/57

TRINKAUS, J.:

Zeitstandsverhalten von Prothesen-  
kunststoffen in mundähnlichem  
Milieu unter Berücksichtigung des  
HEDENT-Verfahrens.

Diss. Marburg 1971

UHLIG, H.:

Über die Dauerbiegefestigkeit  
metallnetzverstärkter Kunststoffe.  
DZZ H13/24, 6.Jg.

VOSS, R.:

I Die Materialeigenschaften von  
Prothesenkunststoffen und ihre  
klinische Bedeutung.

Dtsch. Zahnärztekalendar  
München 82-95, 1968

II Der Einfluß der Elastizität,  
besonders der elastischen Nach-  
wirkung der Prothesenwerkstoffe  
auf das Verhalten der Prothese  
und des tragenden Gewebes.

DZZ 12/ 21/ 1957

## 2. Weitere das Thema betreffende Arbeiten

- CORNELIUS, G.: Untersuchungen über den Einfluß der einseitigen Politur auf Form und Beständigkeit des Paladons unter Berücksichtigung der Wasseraufnahme.  
Diss. Marburg 1952
- DEWEIN, H.: Einführung in die zahnärztlichen Kunststoffprobleme.  
DZZ 13/ 1945/ 1958
- FRANK, K.: Prüfungsbuch für Kautschuk, Gummi und Kunststoffe.  
Berliner Unionverlag  
2. Auflage Stuttgart 1968
- JANKE, G.: I Das Gewichts-, Volumen- und Dichteverhalten unvernetzter Kunststoffe bei Austrocknung und Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Verarbeitung.  
DZZ 1957/ 12/ H21
- II Über die Abbauvorgänge an zahnärztlichen Kunststoffen.  
DZZ 1967/ 22.5./ 684-695

- KÜHL, W. u.  
KNOLL, E.:  
Vergleichende Untersuchungen  
an neuen Prothesenkunststoffen.  
DZZ 1966/ 2o H4/ 109
- MARX, H.:  
Zur Polymerisationsproblematik  
dentaler Methacrylate.  
ZW 1960/ 61/ 747
- MARXKORS, R.:  
Werkstoffe in der zahnärztlichen  
Praxis.  
Johann Ambrosius Barth Verlag 1972
- MÜLLER, F.H.:  
Die Kunststoffe, eine Klasse  
zwischen Stahl und Flüssigkeit.  
Kunststoffe 41.Jg. H2, 1951
- SCHMIDT, A.:  
I Vom Kautschuk zur Kurzpolymerisa-  
tion der Kunststoffe.  
Zahntechniker Zürich 251/ 75-81/ 1967
- II Kunststoffe für zahnärztliche  
Prothetik.  
Dental-Echo H7/75, 12-22

- SCHULTE, W.: Vergleichende Prüfung des Zeit-  
standverhaltens der Prothesen-  
kunststoffe : Self Cure, Palacast,  
Vinalene, P-V-S-H.  
Diss. Harburg 1976
- SCHWIEKERATH, H.: Festigkeits-, Elastizitäts- und  
u. BAWENDI, B. Formänderungseigenschaften von  
Kunststoffen im Gießverfahren.  
ZWR 81. Jg. 1972 Nr. 11
- SCHWIEKERATH, H.: I Elastizität und Druckverteilung.  
DZZ 15/ 1960/ H18
- II Über die Festigkeit der Prothesen-  
basismaterialien.  
DZZ 18/ 1233/ 63
- SCHWINDLING, R.: Erfahrungen mit Prothesen-  
kunststoffen.  
Dtsch. Zahnärzteblatt 20/ 16/ 511/ 1966
- SCHROEDER, A.: Über die Abhängigkeit der Prothesen-  
qualität von den Polymerisations-  
bedingungen.

- TEEKE, H.: Die moderne Kunststoffverarbeitung.  
Quintessenz 1968 H3
- UHLIG, H.: Über die Eigenschaften und Anwendungs-  
gebiete schnellpolymerisierender  
Kunststoffe.  
DZZ H23, 5.Jg. 1950
- VERGIN, F.: Kunststoffe  
DZZ IV, 34
- WILD, W.: Über Zusammensetzung, Verarbeitung  
und Struktur der zur Herstellung  
von Prothesen am meisten gebrauch-  
ten Acrylate.  
SMfZ 11/ 1947
- WALTER, J.D.: The Properties of self-curing  
denture bases.  
British dental journal  
vol. 132, no.6, pp.223-227, 1972

E. ANHANG

Tabelle I                      Unvorbelastete Prüfkörper

| Nr. | Querschnitt(mm) | Kraft (kp) | Kraft bez.a.d. $\varnothing$ (kp/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------|------------|----------------------------------------------------|
| 1   | 2,65 x 3,75     | 30,92      | 311,1                                              |
| 2   | 2,80 x 3,75     | 36,03      | 343,1                                              |
| 3   | 2,80 x 3,80     | 39,06      | 376,1                                              |
| 4   | 2,45 x 3,60     | 33,94      | 384,8                                              |
| 5   | 2,90 x 3,90     | 39,29      | 347,3                                              |
| 6   | 2,50 x 3,85     | 38,36      | 398,5                                              |
| 7   | 2,70 x 3,80     | 33,94      | 330,7                                              |
| 8   | 2,75 x 3,90     | 37,20      | 346,8                                              |
| 9   | 2,75 x 3,65     | 36,73      | 365,9                                              |
| 10  | 2,75 x 3,95     | 34,17      | 314,5                                              |
| 11  | 2,65 x 3,60     | 39,29      | 411,8                                              |
| 12  | 2,70 x 3,90     | 39,75      | 377,4                                              |
| 13  | 2,70 x 3,60     | 35,80      | 368,3                                              |
| 14  | 2,70 x 3,70     | 38,59      | 386,2                                              |
| 15  | 2,60 x 3,85     | 36,96      | 369,2                                              |
| 16  | 2,60 x 3,85     | 34,64      | 346,0                                              |
| 17  | 2,60 x 3,80     | 37,43      | 378,8                                              |
| 18  | 2,50 x 3,90     | 33,48      | 343,3                                              |
| 19  | 2,65 x 4,00     | 39,52      | 373,8                                              |
| 20  | 2,70 x 3,65     | 34,87      | 353,8                                              |
| 21  | 2,55 x 3,75     | 36,04      | 376,8                                              |
| 22  | 2,70 x 3,60     | 37,90      | 389,9                                              |
| 23  | 2,50 x 3,95     | 34,87      | 353,1                                              |
| 24  | 2,55 x 3,90     | 40,92      | 411,4                                              |

Tabelle 1 ( Fortsetzung )    Unvorbelastete Prüfkörper

| Nr. | Querschnitt(mm) | Kraft (kp) | Kraft bez.a.d.Ø (kp/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------|------------|---------------------------------------|
| 25  | 2,60 x 3,65     | 38,13      | 401,7                                 |
| 26  | 2,65 x 3,90     | 38,36      | 371,1                                 |
| 27  | 2,75 x 3,95     | 35,75      | 327,4                                 |
| 28  | 2,80 x 3,80     | 37,43      | 351,7                                 |
| 29  | 2,80 x 3,95     | 35,80      | 323,6                                 |
| 30  | 2,50 x 3,65     | 30,00      | 328,7                                 |
| 31  | 2,60 x 3,95     | 30,22      | 294,2                                 |
| 32  | 2,60 x 3,85     | 32,78      | 340,5                                 |
| 33  | 2,60 x 3,65     | 46,03      | 485,0                                 |
| 34  | 2,70 x 3,90     | 43,71      | 415,0                                 |
| 35  | 2,60 x 4,00     | 32,32      | 310,7                                 |
| 36  | 2,70 x 3,95     | 43,71      | 409,8                                 |
| 37  | 2,65 x 3,80     | 44,64      | 443,2                                 |
| 38  | 2,60 x 3,70     | 46,27      | 480,9                                 |
| 39  | 2,80 x 3,95     | 43,48      | 393,1                                 |
| 40  | 2,85 x 3,90     | 43,71      | 393,2                                 |
| 41  | 2,60 x 3,80     | 41,85      | 423,5                                 |
| 42  | 2,50 x 3,80     | 40,92      | 430,7                                 |
| 43  | 2,70 x 3,95     | 46,50      | 436,0                                 |

---

Mittelwert: 374,6 kp/cm<sup>2</sup>

Tabelle 2    Prüfkörper 30 Minuten vorbelastet

| Nr. | Querschnitt(mm) | Kraft (kp) | Kraft bez.a.d.Ø (kp/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------|------------|---------------------------------------|
| 1   | 2,80 x 3,75     | 37,20      | 354,2                                 |
| 2   | 2,55 x 3,95     | 47,89      | 475,4                                 |
| 3   | 2,40 x 3,85     | 46,03      | 498,1                                 |
| 4   | 2,20 x 3,70     | 26,50      | 325,5                                 |
| 5   | 2,20 x 3,75     | 35,57      | 431,1                                 |
| 6   | 2,75 x 3,65     | 41,85      | 405,8                                 |
| 7   | 2,55 x 3,70     | 34,41      | 369,7                                 |
| 8   | 2,60 x 3,70     | 36,73      | 381,8                                 |
| 9   | 2,50 x 3,80     | 39,52      | 416,0                                 |
| 10  | 2,65 x 3,70     | 39,99      | 407,8                                 |
| 11  | 2,80 x 3,45     | 40,45      | 418,7                                 |
| 12  | 2,40 x 3,60     | 33,01      | 382,0                                 |
| 13  | 2,65 x 3,80     | 42,08      | 441,0                                 |
| 14  | 2,20 x 3,80     | 29,06      | 467,2                                 |
| 15  | 2,70 x 3,55     | 44,17      | 460,8                                 |
| 16  | 2,60 x 3,65     | 36,97      | 389,5                                 |
| 17  | 2,65 x 3,80     | 42,31      | 420,1                                 |
| 18  | 2,55 x 3,80     | 33,48      | 345,5                                 |
| 19  | 2,55 x 3,80     | 38,13      | 393,4                                 |
| 20  | 2,80 x 3,85     | 40,69      | 377,4                                 |
| 21  | 2,60 x 3,50     | 40,69      | 447,1                                 |
| 22  | 2,30 x 3,80     | 32,32      | 369,7                                 |
| 23  | 2,25 x 3,70     | 29,06      | 349,0                                 |
| 24  | 2,35 x 3,60     | 40,22      | 475,4                                 |

Tabelle 2 (Fortsetzung) Prüfkörper 30 Minuten vorbelastet

| Nr. | Querschnitt(mm) | Kraft (kp) | Kraft bez.a.d.Ø (kp/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------|------------|---------------------------------------|
| 25  | 2,55 x 3,75     | 34,18      | 357,4                                 |
| 26  | 2,75 x 3,80     | 39,52      | 378,1                                 |
| 27  | 2,60 x 3,35     | 44,41      | 395,0                                 |
| 28  | 2,25 x 3,60     | 26,27      | 324,3                                 |
| 29  | 2,20 x 3,75     | 33,94      | 411,3                                 |
| 30  | 2,70 x 3,65     | 43,48      | 441,1                                 |
| 31  | 2,70 x 3,75     | 42,78      | 422,5                                 |
| 32  | 2,75 x 3,80     | 47,20      | 451,6                                 |
| 33  | 2,50 x 3,70     | 39,99      | 432,3                                 |
| 34  | 2,60 x 3,90     | 41,15      | 405,8                                 |

---

Mittelwert: 406,5 kp/cm<sup>2</sup>

Tabelle 3 Prüfkörper 60 Minuten vorbelastet

| Nr. | Querschnitt(mm) | Kraft (kp) | kraft bez.a.d.Ø (kp/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------|------------|---------------------------------------|
| 1   | 2,50 x 3,85     | 39,29      | 408,2                                 |
| 2   | 2,70 x 3,50     | 38,13      | 403,4                                 |
| 3   | 2,40 x 3,75     | 41,16      | 457,3                                 |
| 4   | 2,55 x 3,80     | 41,15      | 424,6                                 |
| 5   | 2,40 x 3,70     | 41,08      | 472,7                                 |
| 6   | 2,35 x 3,75     | 34,81      | 395,0                                 |
| 7   | 2,60 x 3,50     | 41,62      | 457,3                                 |
| 8   | 2,40 x 3,60     | 38,55      | 446,1                                 |
| 9   | 2,60 x 3,95     | 41,62      | 405,2                                 |
| 10  | 2,55 x 3,80     | 39,93      | 412,0                                 |
| 11  | 2,55 x 3,80     | 42,54      | 439,0                                 |
| 12  | 2,70 x 3,55     | 43,71      | 456,0                                 |
| 13  | 2,50 x 3,60     | 43,52      | 483,5                                 |
| 14  | 2,60 x 3,55     | 37,29      | 410,8                                 |
| 15  | 2,75 x 3,70     | 41,15      | 404,4                                 |
| 16  | 2,65 x 3,80     | 40,45      | 401,6                                 |
| 17  | 2,70 x 3,70     | 40,92      | 409,6                                 |
| 18  | 2,80 x 3,60     | 43,94      | 435,9                                 |
| 19  | 2,45 x 3,55     | 35,32      | 406,0                                 |
| 20  | 2,50 x 3,95     | 39,76      | 402,6                                 |
| 21  | 2,45 x 3,60     | 31,28      | 354,6                                 |
| 22  | 2,55 x 3,70     | 38,13      | 404,1                                 |
| 23  | 2,55 x 3,75     | 44,64      | 466,8                                 |
| 24  | 2,45 x 3,70     | 41,98      | 463,0                                 |

Tabelle 3 (Fortsetzung) Prüfkörper 60 Minuten vorbelastet

| Nr. | Querschnitt(mm) | Kraft (kp) | Kraft bez.a.d.Ø (kp/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------|------------|---------------------------------------|
| 25  | 2,50 x 3,90     | 41,85      | 429,2                                 |
| 26  | 2,50 x 3,60     | 28,65      | 429,4                                 |
| 27  | 2,50 x 3,90     | 46,23      | 474,1                                 |
| 28  | 2,60 x 3,50     | 33,25      | 365,3                                 |
| 29  | 2,65 x 3,55     | 37,66      | 400,3                                 |
| 30  | 2,60 x 3,60     | 34,64      | 370,0                                 |

---

Mittelwert: 422,9 kp/cm<sup>2</sup>

Tabelle 4 Prüfkörper 90 Minuten vorbelastet

| Nr. | Querschnitt(mm) | Kraft (kp) | Kraft bez. a.d.Ø (kp/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------|------------|----------------------------------------|
| 1   | 2,60 x 3,55     | 41,15      | 445,8                                  |
| 2   | 2,60 x 3,60     | 41,15      | 439,6                                  |
| 3   | 2,65 x 3,65     | 41,62      | 430,2                                  |
| 4   | 2,75 x 3,75     | 43,01      | 417,0                                  |
| 5   | 2,80 x 3,75     | 43,25      | 411,8                                  |
| 6   | 2,65 x 3,85     | 40,92      | 401,0                                  |
| 7   | 2,65 x 3,70     | 38,59      | 393,5                                  |
| 8   | 2,55 x 3,70     | 37,20      | 394,2                                  |
| 9   | 2,65 x 3,60     | 41,38      | 433,7                                  |
| 10  | 2,80 x 3,85     | 36,97      | 342,9                                  |
| 11  | 2,75 x 3,80     | 45,80      | 438,2                                  |
| 12  | 2,50 x 3,65     | 40,92      | 448,4                                  |
| 13  | 2,55 x 3,65     | 42,55      | 457,1                                  |
| 14  | 2,65 x 3,70     | 37,66      | 384,0                                  |
| 15  | 2,60 x 3,80     | 34,87      | 352,9                                  |
| 16  | 2,80 x 3,70     | 46,96      | 453,2                                  |
| 17  | 2,60 x 3,70     | 34,87      | 362,4                                  |
| 18  | 2,70 x 3,90     | 42,55      | 404,0                                  |
| 19  | 2,65 x 3,80     | 39,52      | 392,4                                  |
| 20  | 2,70 x 3,85     | 46,28      | 445,2                                  |
| 21  | 2,60 x 3,75     | 43,01      | 441,1                                  |
| 22  | 2,75 x 3,70     | 35,57      | 349,5                                  |
| 23  | 2,75 x 3,60     | 43,01      | 434,4                                  |
| 24  | 2,50 x 3,60     | 39,99      | 444,3                                  |

Tabelle 4 (Fortsetzung) Prüfkörper 90 Minuten vorbelastet

| Nr. | Querschnitt(mm) | Kraft (kp) | Kraft bez.a.d.Ø (kp/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------|------------|---------------------------------------|
| 25  | 2,60 x 3,55     | 35,57      | 385,3                                 |
| 26  | 2,65 x 3,55     | 39,52      | 420,0                                 |
| 27  | 2,60 x 3,70     | 37,43      | 389,0                                 |
| 28  | 2,60 x 3,65     | 37,20      | 391,9                                 |
| 29  | 2,55 x 3,45     | 36,73      | 417,5                                 |
| 30  | 2,75 x 3,60     | 40,69      | 411,0                                 |
| 31  | 2,65 x 3,80     | 41,38      | 410,9                                 |
| 32  | 2,70 x 3,95     | 42,31      | 396,7                                 |
| 33  | 2,55 x 3,65     | 41,62      | 447,1                                 |
| 34  | 2,60 x 3,75     | 43,24      | 443,4                                 |
| 35  | 2,55 x 3,50     | 37,43      | 419,3                                 |

---

Mittelwert: 412,8 kp/cm<sup>2</sup>

Tabelle 5 Prüfkörper 120 Minuten vorbelastet

| Nr. | Querschnitt(mm) | Kraft (kp) | Kraft bez.a.d.Ø (kp/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------|------------|---------------------------------------|
| 1   | 2,60 x 4,00     | 43,71      | 420,2                                 |
| 2   | 2,70 x 3,80     | 36,73      | 357,9                                 |
| 3   | 2,75 x 3,20     | 36,97      | 420,1                                 |
| 4   | 2,75 x 3,90     | 39,52      | 368,4                                 |
| 5   | 2,45 x 3,85     | 37,66      | 399,2                                 |
| 6   | 2,55 x 3,70     | 41,85      | 443,5                                 |
| 7   | 2,55 x 3,75     | 39,52      | 413,2                                 |
| 8   | 2,65 x 3,55     | 31,62      | 336,1                                 |
| 9   | 2,55 x 3,70     | 41,85      | 443,5                                 |
| 10  | 2,80 x 3,85     | 46,50      | 431,3                                 |
| 11  | 2,70 x 3,90     | 39,52      | 375,3                                 |
| 12  | 2,75 x 3,90     | 46,01      | 429,1                                 |
| 13  | 2,80 x 3,60     | 32,32      | 320,6                                 |
| 14  | 2,55 x 3,55     | 40,45      | 446,8                                 |
| 15  | 2,60 x 3,85     | 38,83      | 327,9                                 |
| 16  | 2,55 x 3,80     | 41,15      | 424,6                                 |
| 17  | 2,60 x 3,95     | 36,50      | 355,4                                 |
| 18  | 2,75 x 3,85     | 42,31      | 399,6                                 |
| 19  | 2,60 x 3,70     | 37,66      | 338,3                                 |
| 20  | 2,65 x 3,70     | 32,55      | 331,9                                 |
| 21  | 2,60 x 3,80     | 37,20      | 376,5                                 |
| 22  | 2,80 x 4,00     | 40,45      | 361,1                                 |
| 23  | 2,70 x 3,90     | 36,27      | 344,4                                 |
| 24  | 2,60 x 3,85     | 40,22      | 401,7                                 |

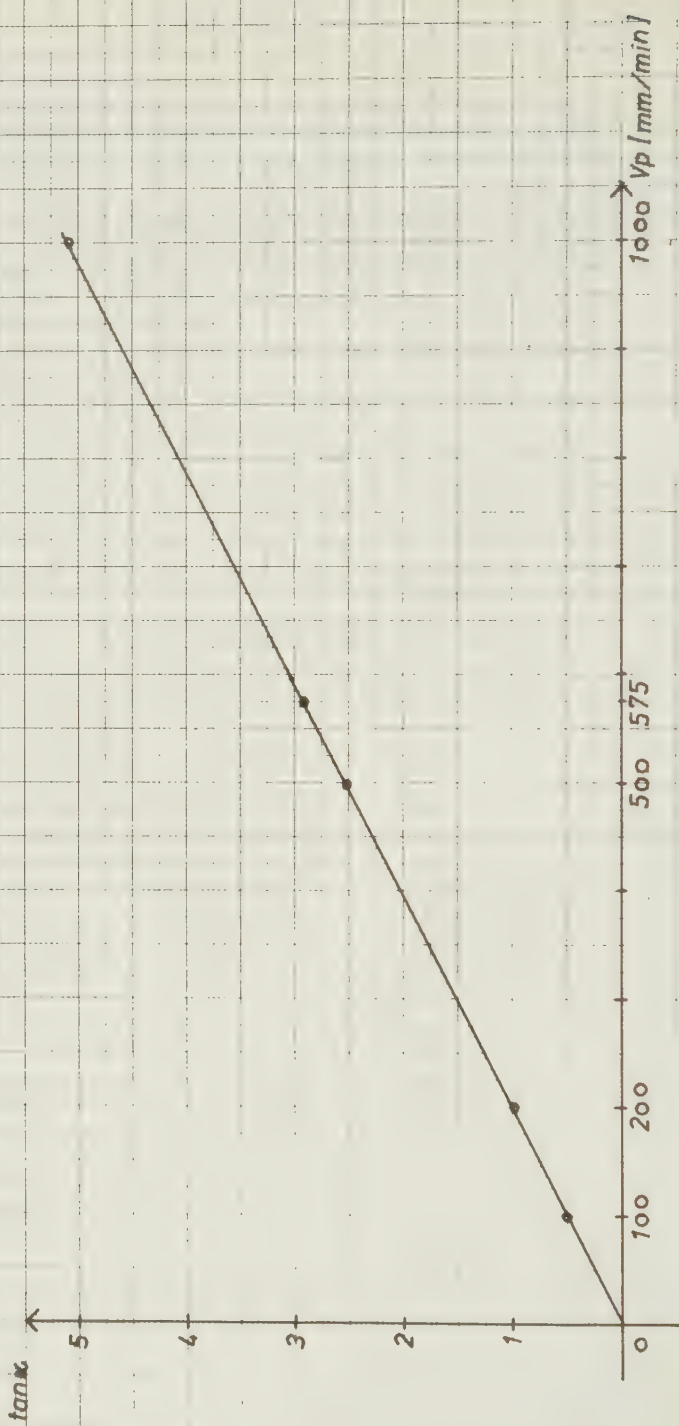
Tabelle 5 (Fortsetzung) Prüfkörper 120 Minuten vorbelastet

| Nr. | Querschnitt(mm) | Kraft (kp) | Kraft bez.a.d.Ø (kp/cm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------|------------|---------------------------------------|
| 25  | 2,65 x 3,80     | 42,31      | 420,1                                 |
| 26  | 2,70 x 3,80     | 37,20      | 362,5                                 |
| 27  | 2,60 x 3,80     | 40,92      | 414,1                                 |
| 28  | 2,50 x 3,55     | 36,04      | 406,0                                 |
| 29  | 2,60 x 3,70     | 40,69      | 422,9                                 |
| 30  | 2,75 x 3,60     | 40,22      | 406,2                                 |
| 31  | 2,70 x 3,50     | 34,64      | 366,5                                 |
| 32  | 2,65 x 3,85     | 38,13      | 373,7                                 |
| 33  | 2,60 x 3,90     | 35,57      | 350,7                                 |

---

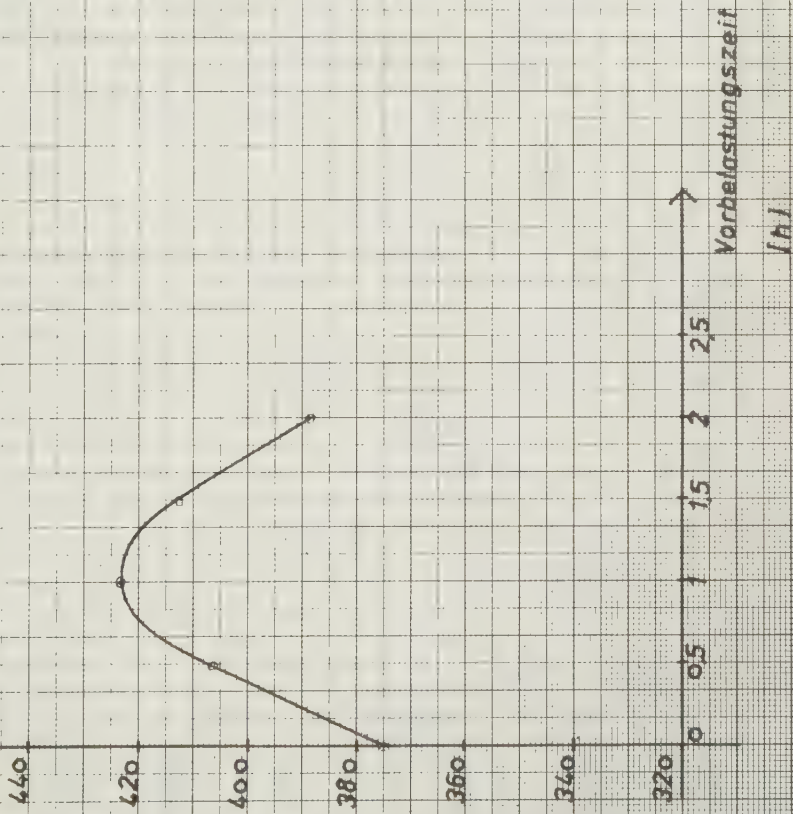
Mittelwert: 389,3 kp/cm<sup>2</sup>

ERMITTLUNG DER ZUGESCHWINDIGKEIT



Zugspannung  
[Kp/cm<sup>2</sup>] ↑

DIAGRAMM 2



Zugspannung

[ $\text{kp}/\text{cm}^2$ ]

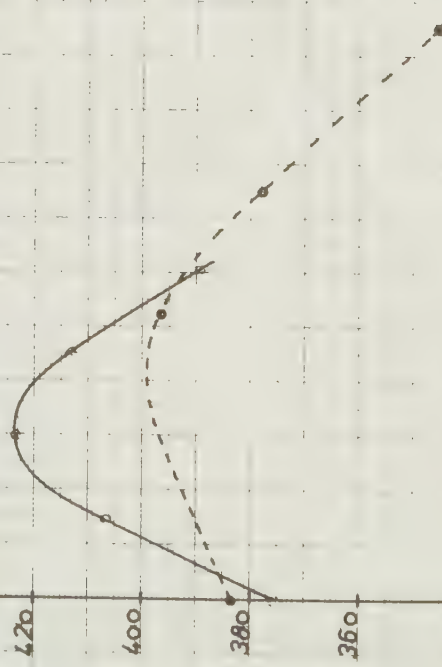
DIAGRAMM 3

(Kurve Pauli gestrichelt)

Vorbelastungszeit  
[h]

Vorbelastungszeit

[h]



Für die Überlassung des Themas sowie für die freundliche Unterstützung bei der Durchführung der vorliegenden Arbeit möchte ich meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. Georg JANKE meinen besonderen Dank aussprechen.

Weiterhin möchte ich Herrn Dr. GORITZ für die Anleitung bei der Durchführung der Zugversuche im Physikalisch-Chemischen Institut der Philipps-Universität Marburg herzlich danken.

## Lebenslauf

Am 10. November 1946 wurde ich als Sohn des Steuerbevollmächtigten Siegfried Kumpel und seiner Ehefrau Hildegard Kumpel, geb. Gondershausen, in Marburg an der Lahn geboren.

Nach dem Besuch der Grundschule lernte ich im Jahre 1968 die Reifeprüfung am Aufbaugymnasium der Gesamtschule in Kirchhain ab.

Ab Wintersemester 1968/69 nahm ich das Studium der allgemeinen Naturwissenschaften an der Philipps-Universität in Marburg auf und wechselte im Sommersemester 1969 zum Studium der Zahnheilkunde. Hier legte ich am 21.9.1970 die naturwissenschaftliche Vorprüfung und am 5.4.1972 die zahnärztliche Vorprüfung ab.

Nach dem klinischen Studium bestand ich am 12.12.74 die zahnärztliche Prüfung vor dem Prüfungsausschuss in Marburg/L. und erhielt am 31.12.74 die Bestallung als Zahnarzt.

Seit dem 1.1.75 arbeite ich als Assistent in der Praxis des Zahnarztes Dr. Gerhard Becker in Büdingen.

Meine akademischen Lehrer waren die Damen und Herren Professoren und Dozenten an der Philipps-Universität Marburg an der Lahn:

AMON, AURICH, BERNHARDT, BOCK, BRAASCH,  
CASTENHOLZ, DEHNICKE, DIMROTH, GANZ, GOLENHOFEN,  
HABERICH, HENNIS, HENSEL, HERING, HEUSER, JANKE,  
KARLSON, KOECKE, KORB, KÜHNEL, NIEMEYER, NÖTH,  
PETRY, PFÜTZ, RIECKEN, ROHEN, RUPEC, SCHIENBEIN,  
SCHIFF, SCHMID, SCHMIDT, SCHMITZ-MOORMANN,  
SCRIBA, SCHNELL, SEIDEL, WALCHER.





